

PÉCZ BÉLA**Fiat lux****Legyen világosság! – mondta a Nobel-díj Bizottság**

Amikor bő 10 éve megjelentek az első igazán jól látható közlekedési lámpák (bennük a LED-ek) nem sejtettük, hogy mindez hova vezet napjainkra, és hogy 2014-ben a fizikai Nobel-díjat a kék LED kifejlesztésért adják. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano és Shuji Nakamura a díjazottak, akik közül az első kettő a Nagojai Egyetemen dolgozik, míg Nakamura jelenleg a University of California, Santa Barbara professzora, korábban Japánban a Nichia Chemicals cégnek dolgozott. Talán érdemes megemlíteni, hogy a Nagojai Egyetem ezzel az ötödik és hatodik Nobel-díjat nyerte. Két részecskefizikus (M. Kobayashi és T. Maskawa, 2008 fizikai Nobel-díj) mellett a 2001-ben kémiai Nobel-díjjal jutalmazott R. Noyori és a 2008-as nyertes (szintén kémia) O. Shimomura is ott dolgozik.



*Isamu Akasaki; Hiroshi Amano, Akasaki korábbi PhD-diákja; Shuji Nakamura
A fizikai Nobel-díj 2014-es díjazottjai (forrás: nobelprize.org)*

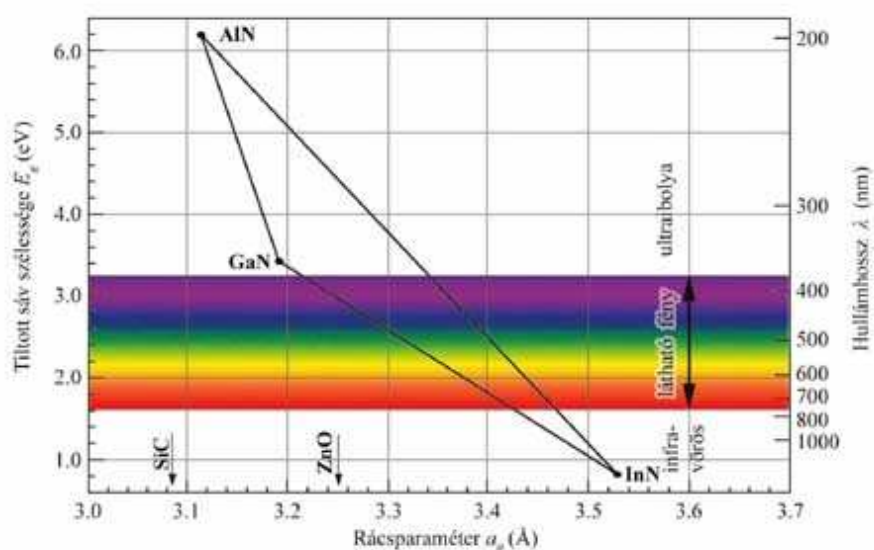
A kék LED-ek segítségével (vörös, sárga és zöld diódák már régóta rendelkezésre álltak) lehetővé tették a fehér fénnel való világítás forradalmát – hangzik a díj indoklásában.

Nézzük meg tehát először a hátteret. A LED (Light Emitting Diode) egy félvezető eszköz, amely keskeny sávban bocsát ki fényt az infravöröstől az ultraibolyáig terjedő tartományban. Ehhez egy úgynevezett direkt tiltott sávú félvezetőre van szükségünk, amiben a vezetési sáv minimuma a vegyértéksáv maximuma felett van. (A vegyértéksávban levő elektronok kötöttek, a vezetési sávban levők szabadon tudnak mozogni.) A félvezetők tiltott sávja néhány elektronvolt, ami lehetővé teszi, hogy a vegyértéksávból elektronokat gerjesszünk fel a vezetési sávba, pozitív töltésű lyukakat hagyva a vegyértéksávban. Ha a félvezetőnket olyan atomokkal adalékoljuk, amiknek eggyel több elektronjuk van, mint a félvezetőt alkotó atomoknak (donorok), akkor ezek igen könnyen a vezetési sávba kerülnek, az anyag vezetőképessége nő, ezt n-típusú félvezetőnek hívjuk. Analóg módon az eggyel kevesebb elektront tartalmazó atommal (akceptor) való adalékolt félvezetőben a lyukak koncentrációja nő meg, ez a p-típusú félvezető. Ha egy p és egy n típusú félvezetőből pn átmenetet hozunk létre (a gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a két anyagot egymásra növesztjük, vagy az egyiket a másik egy tartományában pl. ion-implantációval létrehozzuk), akkor amennyiben ez direkt tiltott sávú, akkor az előfeszített p-n átmenetben az elektronok az n oldalról a p-be hatolnak és az átmeneten a lyukakkal rekombinálódnak. Miközben az elektronok a vezetési sávból a vegyértéksávba kerülnek, energiájuk a direkt sáv szélességével csökken, amit egy foton formájában sugároznak ki. Ez a LED működésének alapja **(1. ábra)**. (Az indirekt sávú félvezetőkben fononok közreműködésére is szükség van az elektronlyuk rekombinációhoz, ami erősen csökkenti a hatásfokot.)



1. ábra. A LED elvi működésének folyamata. (A Nobel-díj indoklásában a kibocsátott fényhullám még vörösre volt színezve)

Könnyen érthető, hogy egy LED által kibocsátott fény színe a félvezető tiltott sáv szélességétől függ. Az $E=hc/\lambda$ képletből (h a Planck-állandó, c a fénysebesség) kiszámítható, hogy adott λ hullámhosszú (azaz színű) LED-hez milyen tiltott sáv szélességű félvezetőre van szükségünk.



2. ábra. GaN és rokon anyagainak rácsparaméterei, tiltott sáv szélessége és az ebből készíthető LED hullámhossza

A **2. ábra** mutatja a GaN és rokon anyagai tiltott sáv szélességét. Ez az anyagrendszer azért csodálatos, mert egymással könnyen ötvözhetőek, és így pl. indium ötvözésével InGaN rétegekből készíthetünk kék LED-eket. A probléma csak az, hogy ezek az anyagok tömbi formában nem elérhetőek, ezekből készült szeletek nem állnak rendelkezésre. (A tömbi GaN nagy nyomáson való növesztésében Prof. S. Porowski, Institute of High Pressure Physics, Varsó ért el sikereket. Ezek a minták kis méretük ellenére igen fontosak voltak már a GaN eszköze fejlesztések kezdeti periódusában is, hiszen ezeken lehetett kimérni fontos fizikai tulajdonságokat. Bár InN-et ők nem növesztettek, de érdemes itt megemlíteni, hogy sokáig a világ 1,9 eV-nak hitte az InN tiltott sáv szélességét, addig, amíg nem tudtak belőle elegendően tiszta rétegeket növesztetni és kiderült, hogy a helyes érték 0,7 eV. Még 1997-ben Akasaki és Amano is 1,9 eV-os értékről ír összefoglaló cikkükben, Jpn. J. Appl. Phys. 36, 1997, 5393)

Ga-nitrid eszközöket tehát csak úgy lehetett létrehozni, ha egy másik egykristály anyagra növesztjük egykristályosan a GaN-et, ún. heteroepitaxiával. Ez az elgondolás is nehezen megvalósítható volt, hiszen nem álltak rendelkezésre hasonló rácsparaméterű szeletek sem.

Akasaki és Amano MOCVD-vel (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) próbált jó minőségű GaN-et növesztetni, azaz magas hőmérsékleten trimethyl gallium és ammónia forrásból kémiai reakcióban választottak le GaN-et

általában zafír(Al_2O_3) szeletekre. (Megjegyzés: a fizikusok a tiszta Al_2O_3 kristályra a zafír megnevezést használják, szemben az ásványtani elnevezéssel, ami korund. A zafír vassal és titánnal szennyezett korund az ásványtan szerint.) A minőség messze elmaradt a várttól, hiszen 15% az eltérés a két anyag rácsávolságaiban (misfit). Nagy rácseltérés esetén sok hiba keletkezik a növekvő rétegben és igen nehéz azt kétdimenziós növekedésre kényszeríteni, márpedig egy durva felületű félvezető réteg eszközök készítésére alkalmatlan. Ezért maradhatott visszhang nélkül, hogy Maruska és Tietjen (Appl. Phys. Lett. 15, 1969, 327) már 1969-ben növesztettek GaN-det zafír hordozóra. Ugyanakkor igen fontos, hogy már akkor rámutattak arra, hogy a GaN direkt tiltott sávú félvezető és a bandgap szobahőmérsékleten 3,39 eV. Ugyan 1983-ban Yoshida és munkatársai (Appl. Phys. Lett. 42, 1983, 427) már alkalmaztak AlN réteget a zafíron a GaN növesztése előtt, de a molekulásugaras epitaxiával előállított rétegekben az elektronok mozgékonyága mindössze $35 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ volt. 1986-ban jött el az áttörés, amikor kétlépcsős növesztést alkalmaztak (Amano és munkatársai, Appl. Phys. Lett. 48, 1986, 353), először viszonylag alacsony hőmérsékleten (500°C) egy vékony AlN réteget (50 nm) növesztettek, majd megemelve a hőmérsékletet (1000°C) erre növesztettek vastagabb GaN réteget. Ezzel a tükröző felületű, repedésmentes és jó minőségű GaN rétegek elérhetővé váltak az elektronika és az optoelektronika nagyon sok alkalmazása számára. Nakamura 1991-es cikkében (Japanese J. Appl. Phys. 30, 1991, L1705), arra mutatott rá, hogy amikor GaN-ből növeszti az alacsony hőmérsékleten leválasztott buffert is, akkor az elektron mozgékonyág jóval meghaladja az Akasaki és Amano által AlN bufferen kapott $350\text{--}430 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ értékeket. A növesztési eljárások természetesen tovább finomodtak. Amikor bevezették a zafír nitridálását (a szeletet a növesztés megkezdése előtt rövid ideig 1000°C -on tartják ammónia áramban) rámutattunk (Pécz és munkatársai J. Appl. Phys., 86 (1999) 6059), hogy a zafír hordozó és az ammónia közti reakcióban a felületen AlN keletkezik és az azután leválasztott AlN buffer már erre nő.

Ahogy azt a második ábrán bemutattuk, legalább egy p-n átmenetre szükségünk van, tehát meg kellett oldani a GaN adalékolását is, amiben a p-típus kialakítása jelentette a kihívást. Amano és Akasaki fontos megfigyelést írtak le, amikor észrevették, hogy a pásztázó elektronmikroszkópban a Zn-kel adalékolt GaN több fényt emittál. Hasonlóan a kisenergiás elektronokkal besugárzott, Mg-mal adalékolt GaN is jobb p-típusú tulajdonságokat mutatott. Érdekes módon a jelenséget Nakamura és munkatársai magyarázták meg azzal, hogy a Mg és a Zn hidrogénkomplexeket képez, amiket az elektronsugár elbont, és így aktiválja ezeket az akceptorokat. Nakamura azt is megmutatta, hogy egyszerű hőkezeléssel is lehet a Mg-ot aktiválni. A ternér rétegek (InGaN és AlGaN) növesztését és adalékolását mindkét csoport megoldotta a 90-es évek első felében.

A magas hatásfok eléréséhez kettős heteroszerkezetek, ún. quantum well szerkezetek is kellenek. Az ilyen szerkezetekben az elektronok és a lyukak egy kis térrészbe injektálódnak, ahol a rekombináció magasabb hatásfokkal megy végbe, azaz több fény keletkezik. Akasaki és Amano AlGaIn/GaN szerkezetekkel kísérleteztek. (Érdekesség, hogy ebben a témában közös cikkük van az egyik munkatársunkkal, Radnóczy György Zoltánnal – Physica B 340-342, 2003, 1129.) Nakamura eközben sikeresen alkalmazta az InGaIn/GaN, ill. InGaIn/AlGaIn heteroszerkezeteket, quantum well-eket és multi quantum well szerkezeteket, 1994-ben 2,7%-os kvantum hatásfokról számolt be, ami a korábbi értékekhez képest óriási előrelépés volt, majd nemsokára a 12%-ot érték el (2006-ra 36%-ot). 1995/1996-ra mindkét csapatnak sikerült a bonyolultabb szerkezetet igénylő kék lézert is előállítani. Az első európai kék lézer diódát az OSRAM készítette (physica status solidi 180, 2000, 177) 2000-ben. Ennek az élettartamát később egy nagy EU projektben (EURONIM) sikerült jelentősen növelni, a GaN diszlokáció sűrűségének lecsökkentésével. A kék lézerrel a mindenki számára ismerős Blue Ray technológia előtt nyílt meg az út és az információtárolásban nagyon nagy fejlődést jelentett. A díjazottak már ezzel többet tettek, mint ami a díj rövid indoklásában áll.

A Nobel-díj indoklása elsősorban azt emelte ki, hogy a kék LED segítségével elérhetővé vált a LED-es fehér világítás. Ez a gyakorlatban igen ritkán valósul meg a színek kikeverésével (RGB), mert az a világítástechnikában drága lenne. Ehelyett a kék LED-ek felületét foszforral vonják be, ami a kék fényt fehérre konvertálja számunkra. Ezek ma már megközelítik a 300 lumen/W fényességet a fénycsövek 70 lumen/W értékeivel szemben (a volfrám izzószálról már ne is beszéljünk a maga 16 lumen/W értékével és 4%-os hatásfokával). Emellett ezek a fényforrások nemcsak 50% feletti hatásfokkal működnek (wall plug efficiency, az emittált fénytjeljesítmény és a felvett elektromos teljesítmény hányadosa), hanem élettartamuk közelíti a 100 000 órát. Mindez óriási energiamegtakarítást tesz lehetővé, mert a felhasznált elektromos energia kb. 25%-a világításra fordítódik. Természetesen mindezt olcsón kell előállítani. Az elmúlt néhány évben Prof. Sir Colin Humphreys csapata a Cambridge Universityn sikerrel növesztett GaN LED szerkezeteket 6" átmérőjű Si szeletekre, amik a legolcsóbb hordozók. Ezt a technológiát sikerrel optimalizálta és átadta a Plessey-nek, ami most egyszerre 7 db ilyen szeletre növeszti a LED szerkezeteket.

A LED-es világítás látványos felhasználási területe az autók lámpáiban megjelent és igen gyorsan terjedő LED-es, sőt újabban lézeres világítás. Ezek nemcsak igen fényesek és hatékonyak, hanem mivel ezeknek az áramfelvétele kicsi, így végső soron környezetvédelmi szempontból is előrelépést jelentenek.

Látjuk, hogy a díjazottak eredményei az optoelektronikán belül meghaladták a LED témakörét. Ugyanakkor utat nyitottak más, nem optoelektronikai eszközöknek is, mint pl. a nagyfrekvenciás, nagyteljesítményű tranzisztorok. A kétlépcsős növesztési technológia, a jó minőségű, egykristály GaN rétegek nélkül ezek nem készülhettek volna el. Márpedig a GaN alapú HEMT (High Electron Mobility Transistor) szerkezetek is igen fontosak, ezek mintegy 160 GHz-ig használhatóak és kb. 50 W/mm teljesítménysűrűséget (ahol mm-ben a gate hosszát értjük) érnek el a legújabb fejlesztésekben, és 8–10 W/mm-es értékkel kereskedelmi forgalomban is kaphatóak. Ezekben az eszközökben egy GaAlN/GaN határfelületen (újabbán rácsillesztett InAlN/GaN határfelületen) kétdimenziós elektrongáz keletkezik, és a töltéshordozók mozgékonyasága igen nagy. Ezek az eszközök miniatürizálják a távközlést és a teljesítményelektronikát. Bár a szokásos nagy bonyolultságú Si processzorokat és áramköröket a GaN soha nem fogja helyettesíteni (költség okokból), de a nagyfrekvenciás alkalmazásokban új lehetőségeket nyitnak. A nagyon magas teljesítmény miatt jelenleg az egyik legérdekesebb kutatás-fejlesztés pontosan az ilyen eszközök hődisszipációját akarja megoldani nagyon jó hővezető anyagok, pl. gyémánt, vagy grafén felhasználásával.

A CVD növesztett gyémánt technológia is óriásit kell, hogy fejlődjön ehhez. Jelenleg cm^2 -nél kisebb darabkák (szeletek) érhetők el egykristály formájában, nagyon jó minőségben. Léteznek már legalább 2" átmérőjű gyémánt szeletek is, ezek azonban legfeljebb kitüntetett orientációval rendelkeznek, de alapvetően polikristályosak. Jóslani nem szeretnék, de lehet, hogy a gyémánt növesztése és adalékolása terén is átéljük azt a fantasztikus fejlesztési korszakot a következő 20 évben, amit a GaN terén is nehéz lett volna előre jóslani.

Talán ismert az a sajtóvisszhang, ami szerint Holonyákot mint a LED feltalálóját, érdemtelenül mellőzte a Nobel-díj Bizottság. Az indoklás kiterjesztésével a fenti szempontokra (eszközökre) ez a vita elkerülhető lett volna. Meglátásom szerint a három díjazott megérdemelten kapta az elismerést, és az indoklásban felsoroltnál sokkal több érdemet szerzett.